




CCD 天体测量学

冒蔚 季凯帆 李彬华 杨磊 铁琼仙 著

云南科技出版社



CCD
天体测量学
CCD Tianti Celiangxue

责任编辑 / 王 韬
封面设计 / 杨 峻
责任校对 / 廖坤红
责任印制 / 翟 苑

ISBN 7-5416-1782-2



9 787541 617829 >

ISBN 7-5416-1782-2/P-29

定价: 20.00 元

CCD 天体测量学

冒蔚 季凯帆 李彬华 杨磊 铁琼仙 著

云南科技出版社
·昆明·

图书在版编目(CIP)数据

CCD天体测量学/冒蔚等著. —昆明:云南科技出版社,2003.4

ISBN 7-5416-1782-2

I . C . . . II . 冒 . . . III . 电子望远镜—应用—天体测量 IV . P12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 023918 号

云南科技出版社出版发行

(昆明市环城西路 609 号云南新闻出版大楼 邮政编码:650034)

昆明市五华区教育委员会印刷厂印刷 全国新华书店经销

开本:850mm×1168mm 1/32 印张:8.5 字数:213千字

2003年4月第1版 2003年4月第1次印刷

印数:1~500 定价:20.00元

内容提要

本书介绍了 CCD 应用于天体测量领域 20 年来已经显示出来的高精度和高效率,分析了在这发展过程中尚未解决的三个主要问题,并且针对这些问题阐述了解决办法,包括:适应天体测量精度要求的数字星像处理方法——二维修正矩法;影响 CCD 图像之间相对位置的各项误差的测定和修正方法,以及大气折射和光行差较差修正方法;用 CCD 测微器对天体位置进行绝对测定的方法。这些问题的解决,将能使地面光学基本天体测量学在观测精度、星等和效率方面达到一个较大飞跃,为建立实用的准惯性天球参考架,为天体力学和恒星天文学的发展提供有用的观测数据。

目 录

1 引 言	1
参考文献	7
2 CCD的原理及其特性.....	8
2.1 辐射探测器的发展	8
2.1.1 人眼	8
2.1.2 照相底片	9
2.1.3 光电探测器	11
2.2 CCD的基本工作原理	13
2.2.1 电荷存贮 ^[1]	13
2.2.2 电荷转移	14
2.2.3 CCD的电极转移结构 ^[2]	14
2.2.4 电荷输入及检测	17
2.3 CCD的噪声源 ^[3]	18
2.3.1 KTC噪声	18
2.3.2 产生-复合噪声	18
2.3.3 1/f噪声	19
2.3.4 温度噪声和颤噪声	19
2.4 CCD的物理参数	20
2.5 CCD参数的优化 ^[4]	26
2.6 大尺寸 CCD的发展 ^[5]	28
参考文献	29

3	CCD 图像处理方法	30
3.1	数字图像的常用处理方法 ^[1]	30
3.1.1	数字图像概述	30
3.1.2	数字化图像的增强方法	31
3.1.3	数字图像的复原	36
3.1.4	图像信息的压缩	39
3.2	天文 CCD 图像特点及预处理方法	43
3.2.1	长曝光的光学传递函数	43
3.2.2	光噪声统计特性 ^[2]	44
3.2.3	CCD 器件噪声	46
3.2.4	CCD 图像的计算机模拟	47
3.2.5	CCD 图像的预处理	48
3.3	CCD 图像的一维定心方法	50
3.3.1	边缘分布 ^[3]	51
3.3.2	高斯拟合法	52
3.3.3	修正矩方法 ^[3]	53
3.3.4	中值法 ^[3]	55
3.3.5	寻导法 ^[3]	56
3.3.6	几种方法的比较	58
3.4	CCD 图像的二维定心方法	60
3.4.1	二维高斯拟合法	60
3.4.2	二维修正矩方法	62
3.4.3	各种噪声分布对二维修正矩方法的影响	63
3.4.4	二维修正矩方法的理论解	67
3.4.5	二维高斯拟合法与二维修正矩方法的比较	72
3.4.6	OCL0452 疏散星团恒星位置的测定	73
3.4.7	关于星像平滑方法的讨论	77
3.5	FTTS 图像格式 ^[5]	80

参考文献	84
4 CCD 相对测量	85
4.1 照相方法的评述	86
4.1.1 照相方法的发展	86
4.1.2 照相观测的原理	90
4.1.3 底片模型对精度的限制	98
4.1.4 采用四常数模型的需要和可能	104
4.2 用四常数模型作 CCD 相对测量的转换	105
4.2.1 简化成四常数模型的条件	105
4.2.2 两轴不垂直偏量和两轴方向比例尺之比的 测定	108
4.2.3 大气折射较差修正	111
4.2.4 光行差较差修正	129
4.2.5 光心偏差和物镜组偏心畸变的测定和修正	135
4.2.6 各类修正的修正顺序和交叉项	139
4.3 CCD 底片重叠法	143
4.3.1 CCD 底片重叠法的意义	143
4.3.2 CCD 底片重叠法的观测原理	146
参考文献	156
5 天体位置的 CCD 绝对测定	157
5.1 绝对测定方法和仪器的发展	158
5.1.1 地面观测绝对测定天体位置的意义	158
5.1.2 传统的子午绝对测定方法和传统子午环	162
5.1.3 传统子午环配备 CCD 测微器	166
5.1.4 低纬子午环和低纬子午绝对测定方法简介	169
5.2 低纬子午环配备 CCD 测微器的观测原理	180

5.2.1	子午方向的观测方法	181
5.2.2	卯酉方向的观测方法	186
5.2.3	镜筒弯曲的测定	190
5.2.4	观测近极星来测定方位差和瞬时纬度	193
5.2.5	CCD视场大小和芯片的预置位置	199
5.2.6	星径曲率改正	201
5.3	量度坐标的各种修正	212
5.3.1	CCD芯片的制造误差和安装误差的测定和 修正	213
5.3.2	比例尺及其变化的测定	219
5.3.3	子午方向和卯酉方向观测的大气折射较差 修正	224
5.3.4	子午方向和卯酉方向观测的光行差较差修正	229
5.3.5	方位差和水平差较差修正	236
5.3.6	投影修正和光心偏差的测定及修正	239
5.3.7	视场中所有天体位置的同时绝对测定	243
	参考文献	245
6	CCD的应用将促进学科发展	246
6.1	实用的准惯性天球参考架的建立	247
6.2	为恒星天文学研究提供观测资料	255

1 引 言

以传统子午环为代表的地面光学天体测量仪器,其测微器的每一次更新和发展,都引起了观测精度和极限星等的提高,也促进了仪器误差理论的完善和发展。早期的耳目法观测,精度仅达几角秒,发展到现代的多狭缝光子计数测微器,观测精度已达到了 $\pm 0.15''$ 左右,接近于地面光学仪器定位测量精度的极限,极限星等也从 8^m 左右提高到 13^m 。照相技术在天体测量领域的应用,由每次的单星像测量变为多星像同时测量,并利用星光的积累效应,使得极限星等和观测效率产生了一次大飞跃,还逐步地在仪器研制、观测方法、底片处理和测量归算等方面建立了相应的误差理论,形成了当时的一门新的分支学科——照相天体测量学。新型光子探测器器件 CCD 在天体测量领域的应用,不仅能同时测量多星像的位置,而且由于它的量子效率高、光谱响应宽、动态范围大、读出噪声和暗流易于抑制等特点,与照相技术相比,在同样的望远镜上,在同样的露光时间内,可对更暗天体的像取得精度更高的测量结果。由于 CCD 用于天体照相仪上作天体位置相对测量时,误差来源、测量和处理方法,与照相技术有所不同,用于子午仪器上对天体位置作绝对测定时,获得数据的方式、误差的来源和表达形式等,与目视动丝测微器及光电测微器都大不相同,以致必须建立与之相适应的误差理论,也理所当然地,应当与照相天体测量学并立的,形成一门 CCD 天体测量学。

20 世纪 70 年代末期,CCD 在天文观测中开始试用后,立即受到天体物理工作者的普遍关注,世界上许多大、中型望远镜先后配

备了 CCD 终端,并且取得了喜人的观测结果。CCD 测量系统的优良性能也同样地引起了天体测量学界的兴趣。天体测量工作者借助于大望远镜上的 CCD 测量系统,在恒星的视差和自行、河外天体的光学定位以及太阳系小天体的定位等方面,进行了有益的探索和应用,还在子午环上配备了 CCD 测微器,进行大量暗星位置的相对测量,同样取得了令人鼓舞的结果,已显示出在观测精度、观测效率和极限星等方面将能产生一个飞跃。

开创了 CCD 用于测量恒星三角视差先例的是 D.G.Monet 等人^[1],他们利用了基特峰国立天文台 4 米望远镜上的 Fairchild 221 CCD(象元数为 109×244 ,读出噪声为 $20e^-$,量子效率仅为 15%),经三年观测,获得暗达 18^m 的恒星视差测定值,内精度为 $\pm 0.002'' \sim 0.004''$,优于同期 R.S.Harrington 等人利用十年照相观测所获得的精度为 $\pm 0.0057''$ 的结果^[2]。1992 年,Monet 等人^[3]又发表了他们在 1.55 米望远镜上利用 TI CCD(象元数为 800×800 ,读出噪声为 $18 e^-$,量子效率为 50%)测量 $15^m \sim 17^m.5$ 恒星的三角视差的结果,精度介于 $\pm 0.0005'' \sim 0.0027''$ 之间,中间值为 $\pm 0.001''$ 。这种测量结果不仅显示了 CCD 用于视差测量优于照相测量,而且在观测星等和测量精度方面都已经超过了依巴谷天体测量卫星(Hipparcos)所能达到的目标,展示了地面 CCD 探测器的应用前景。

自行的测定,传统的要求是在两个观测历元之间的时期内,恒星在天球上的位移量远超过每一历元的位置测量误差,才能获得可靠的恒星自行数据,对照相观测而言,在较好的情况下,单次测量误差为 $\pm 0.1'' \sim 0.3''$,两个观测历元需要相距 30 年左右。1986 年,郭新建等人^[3]利用云南天文台 1 米望远镜的 CCD 系统测量河外星系与恒星之间的相对位置,单次测量的精度为 $\pm 0.047''$,在对星像测量方法作进一步的改进和完善后,单次测量精度可达 $\pm 0.01'' \sim 0.02''$,从而可以在间距更短的两个历元观测,获得足够精确的恒星自行,加上 CCD 对河外天体作光学定位的测量,只要测

量和处理方法合适,其误差来源将比照相方法单一,以致有可能直接获得恒星相对于河外天体的高精度的绝对自行。在射电和光学天球参考架的连接中,测定现有星表的剩余旋转,特别是测定畸变很小的依巴谷恒星参考架相对于河外射电源天球参考架的微小旋转,实质上就是把这一恒星参考架中统计平差出的恒星自行转换成相对于遥远的河外射电源光学对应体的绝对自行,这就要求首先证认出河外射电源的光学对应体,再测定从恒星参考架中选择出的若干颗恒星相对于这些光学对应体的绝对自行。由于河外射电源的光学对应体往往比较暗,介于 $16^m \sim 20^m$ 之间,利用 CCD 高量子效率和测量精度高的特点,将能很好地实现这一目标。早在 1982 年, A. N. Argue 就利用英 - 澳的 3.9 米望远镜上的 CCD 测量系统进行了成功的尝试^[4],显示了利用 CCD 观测进行河外射电源光学定位的潜力。

太阳系小天体,如小行星和彗星等,其特点是运动速度快,星等变化大,使精确定位受到一定的限制,但是利用 CCD 的量子效率高和动态范围大等特点,可以对它们进行相对位置的高精度测量。1985 年,吴光节等人利用云南天文台 1 米望远镜上的 CCD 测量系统搜索哈雷彗星,在当时哈雷彗星还暗于该仪器照相极限星等的情况下,用 CCD 获得了清晰的彗星图像,并且测定了它的相对位置;1987 年,许水等人利用同一仪器上的 CCD 测量系统对 5 号小行星进行试验观测,取得了单次测定精度为 $\pm 0.035''$ 的相对测量结果。

子午环配备 CCD 测微器,经过 R. C. Stone 等人的探索和试验后,已在普尔科沃天文台 MK - 200 子午环^[5]和东京天文台 PMC - 190 子午环^[6]等仪器上推广。Stone 等人把美国海军天文台 Flagstaff 工作站的 8 英寸子午环配上 CCD 测微器后,变为一架天体测量扫描式子午望远镜来使用,在观测时,望远镜固定指向某一天顶距, CCD 采用漂移读出的方式来获得星像的图像,每颗星的露

光时间为星像穿过 CCD 视场的时间,这样,每次观测到一条与 CCD 视场等宽度的赤纬带,带长即为赤经跨度,等于一次观测的时间跨度。他们刚开始时采用的 CCD 为 TI 800 × 800 芯片,视场为 20' × 20',观测的极限星等达 17.5^m,加衰减器后,最亮的星为 5^m,在每个视场中星像多于 50 颗,每小时能观测到两千颗天体,获得它们之间的相对位置,在该仪器可观测的整个天区内,可观测到目前协议的河外射电源天球参考架中的 77 颗射电源的光学对应体^[7]。之后,他们把 CCD 换成 CRAF/cassini 1024 × 1024 芯片,观测星等介于 3.5^m ~ 17.5^m 之间,在某些天区,一个视场中的星像多达 300 颗,1 小时可观测到 9000 颗天体,对于亮于 16^m 的恒星,单次测定精度为 ±0.05",而 17.5^m 的恒星,相应的精度为 ±0.20"。

以上所列举的几个典型例子已经充分显示了 CCD 应用于地面光学天体测量的美好前景。CCD 在空间天体测量领域的应用,正在规划中。第一颗依巴谷卫星计划的成功,鼓舞着天文学家们提出了发射第二颗依巴谷卫星的计划,利用 CCD 作为调制探测器,代替第一颗依巴谷卫星的析像管主探测器,由于它的光学效应比析像管至少高一千倍,用同样的 29 厘米口径的望远镜,将能对 1.5×10^7 颗亮于 14^m 的恒星作测量,预期在 2.5 年内,对亮于 10^m 的恒星的的天体测量参数,精度达到 ±0.5mas,并进行精确的多色测光^[8]。现在已提出了精度更高、观测星等更暗、被测天体更多的几个空间计划,准备在本世纪前 10 年内实施。

经过人们在 20 年内的探索和试验,CCD 在天体测量领域的应用,已显示出其强大的生命力,它将对基本天体测量学科的发展产生很大的推动作用,为天体力学、天体物理学等学科的需要提供范围更广、精度更高的测量数据。但纵观这 20 年来,CCD 测量系统的应用,除了与照相底片相比,视场较小,有待于大面积 CCD 芯片的问世和芯片拼接技术的完善之外,尚有三个问题没有很好地得到解决,这限制了这种新型光子探测器件的各种优良特性的充分

发挥。这三个问题是：

(1)至今为止没有一个国际通用的满足于天体定位测量特殊要求的图像处理软件包。CCD在天体测量工作中的应用大部分都是在为使用为天体物理工作需要而编制的软件,这些软件虽然也包含有一些星像定位测量的功能,但不是重点,一般均采用某种高斯拟合法来拟合星像轮廓,不完全满足基本天体测量高精度、高效率地处理大量暗弱天体,包括不规则天体的要求,影响了各种天体像的定位测量精度。

(2)天体在天球上的几何坐标与其成像在芯片上的量度坐标之间的转换,仍采用照相天体测量的那套方法。照相天体测量中,多年来形成的一套成熟的方法是:在几何坐标与量度坐标之间借助于理想坐标来过渡,即先将参考星的几何坐标换算成理想坐标,与这些星的量度坐标组合求解出底片常数,用于将待测星的量度坐标换算成理想坐标,最后得到待测星的几何坐标。在这过程中,把量度坐标系与理想坐标系之间坐标原点和坐标轴指向的差异、各种畸变和较差改正的影响等,都归入底片常数中求解出来,一般情况下,可用的参考星数量限制了底片常数的数目,即限制了底片模型的完整性,对于 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的底片视场,通常都用六常数模型,使得视场边缘处只能达到 $\pm 0.05'' \sim 0.1''$ 的处理精度(见第四章),从而影响了 CCD 测量的高精度优势的发挥。

(3)尚未有 CCD 测量用于天体位置绝对测定的先例。子午环是用于对天体位置进行绝对测定的传统的基本天体测量仪器,但在配备 CCD 测微器后,都没有发挥这种仪器原有的绝对测定功能,这是由于传统子午环测定仪器误差的方法限制了仪器各种误差的测定精度,使之不能与 CCD 测量的高精度相匹配,而作为扫描式子午望远镜用于天体位置的相对测量,更能发挥测量的高星等和高精度的优势。但是,如果能将 CCD 用于天体位置绝对测定,特别是利用其高星等和高精度的优势,对暗弱的河外星系和河

外射电源的光学对应体作绝对定位测量,并伴以大量恒星及其他天体的绝对定位或相对测量,将能为直接建立光学波段的准惯性的天球参考架,以及直接在一个准惯性天球参考架中提供各类天体的天体测量参数等方面,发挥重要的作用。

本书旨在探讨和阐述解决以上三个问题的途径,并建立相应的误差理论。书中在第二章介绍了 CCD 的物理特性的基础上,第三章探讨和提出了满足于星像高精度定位测量要求的数字星像处理方法——二维修正矩方法;第四章根据对照相天体测量中传统处理方法对精度限制的分析,阐述了对各种畸变和较差影响逐项作修正,进而简化底片模型的处理方法;第五章从低纬子午环的观测原理和误差理论出发,叙述了 CCD 测量用于天体位置绝对测定的观测方法和处理方法;在探索出这三个问题解决途径后,第六章就 CCD 在天体测量领域应用后,对本学科及有关学科发展的影响,给出了简单的展望。

这三个问题的解决途径和相应的误差理论,都是根据地面光学天体测量的实际情况和要求提出的,因为与空间测量相比,地面观测的误差来源较多,测量数据受到仪器重力变形和热变形的影响,也受到地球大气和地球物理参数变化的影响;在高精度要求下,探索抑制各种误差影响的处理方法,将更实际和更完善一些,也因为在空间天体测量迅速发展的时代,地面光学天体测量仍不会失去其本身的优势:地面测量具有较大的灵活性和长期性,可以对有兴趣的天体和天区加强观测,并根据需要作长期的观测资料积累;地面测量数据含有地球自转和空间运动的信息,也含有地球物理信息,有利于天球参考架与地球参考架之间的协调,并为地球物理研究提供有用的测量数据;地面测量比较保险,成功率高,设备易于维持,费用较低,有利于多布观测点。另外,有一些地面测量不是空间测量所能替代的,除了与地球有关的信息的测量以外,像太阳系小天体的测量、一些特殊天体的测量,都需要长期的观测

资料的积累,只有通过地面的长期观测,才能满足分析研究的要求。问题在于:在空间时代,如何发展地面光学天体测量?它应在空间天体测量的刺激和启发下,探索新的观测原理、研制新型仪器设备,逐步克服影响地面测量精度提高的主要障碍——仪器重力变形和热变形,以及地球大气的影 响,并且采用如 CCD 这样的新型光子探测器件,使某些参量能取得与空间测量可比的精度,即可与空间测量相互配合的资格,地面和空间的测量相互配合,取长补短,定能促使基本天体测量学和有关学科的发展跃上一个新的台阶。只要合理地应用不断发展的新技术和新工艺,这一目标是不难达到的。

参考文献

- 1 D.G.Monet, C.C.Dahn, A.J., 1983, 188(10): 1489 ~ 1507
- 2 R.S.Harrington, et al., A.J., 1983, 188(7): 1038 ~ 1039
- 3 Mao Wei, et al., 1989, Astron.Astrophys., 215: 190 ~ 194
- 4 A.N.Argue, Mon.Not.R.Astr.Soc., 1984, 211: 713 ~ 718
- 5 V.N.Yerskov, et al., IAU Symp., 1990, 141: 91 ~ 92
- 6 M.Miyamoto, IAU Report on Astronomy, 1991, XXIA: 29 ~ 40
- 7 R.C.Stone, D.G.Monet, IAU Symp. 1990, 141: 369 ~ 370
- 8 E.Hog, et al., IAU Symp. 1993, 156: 31

2 CCD 的原理及其特性

2.1 辐射探测器的发展

作为一门以观测为基础的科学,天文学离不开对天体辐射的测量。能够将辐射能转换为可测信号的器件就称之为辐射探测器。对于不同的天文对象和不同的观测目的,需要与之相适应的辐射探测器。按所观测辐射的波长来分,无线电波所用的探测器一般为偶极子天线配合接收机;红外线探测器用红外底片,硫化铅光电导探测器及锗辐射计;人眼是最原始的可见光探测器,目前,照相乳胶、光电倍增管、光电二极管、像增强器、CCD 等等也用于这一波段的观测,其它如紫外乳胶、核乳胶、正比计数器、闪烁计数器、火花室、电离室和切连科夫计数器等等,则用于对紫外线、X 射线、 γ 射线和高能粒子的探测。对天体测量而言,最常用的莫过于可见光辐射探测器。在本节中,我们将对其发展作一些扼要的介绍。

2.1.1 人 眼

人类首先用于观察天体的探测器就是人眼,而且目视观测几乎到上世纪才被照相、光电等方法所逐步取代。

眼睛是通过与大脑相配合来完成视觉过程的。在不同的外界条件下,采用不同的状态来达到最佳的效果,因而从某种意义上讲它是一架能随环境变化而变化的辐射探测器。眼睛最重要的一个